

0- 769297

Санкт-Петербургский государственный университет

На правах рукописи

Минц Алексей Александрович

***Взаимодействие звёзд фона со
звёздными скоплениями***

Специальность 01.03.01 — астрометрия и небесная механика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук



Санкт-Петербург — 2008

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук Орлов Виктор Владимирович.

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор Расторгуев Алексей Сергеевич, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова.

Кандидат физико-математических наук Железнов Николай Борисович, Институт прикладной астрономии РАН.

Ведущая организация:

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН.

Защита состоится 22 апреля 2008 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.232.15 по защите диссертаций на соискание учёной степени доктора наук при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, ауд. 2143 (математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан

“13 ” *апреля* 2008 года

Ученый секретарь
диссертационного совета

Орлов В.В.



НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000431532

1 Общая характеристика работы

1.1 Актуальность темы

Современные теории звездообразования исходят из того, что значительная часть звёзд формируется в составе скоплений, которые затем постепенно распадаются на одиночные и кратные звёзды. С осознанием этого факта возникла необходимость не только анализировать астрофизические процессы, происходящие в одиночных звёздах, но и рассматривать комплексную эволюцию звёздного скопления, учитывая как гравитационные эффекты, так и более сложные взаимодействия звёзд, такие, как приливы, физические столкновения, потеря массы, взаимодействие звёзд с межзвёздным газом [1]. Сложность таких систем практически исключает возможность детального аналитического описания, необходимы численные методы. Их активная разработка вместе с бурным развитием вычислительной техники позволяет сейчас проводить численное моделирование динамической эволюции звёздных скоплений с высокой точностью и на больших временных промежутках (см., например, [4], [13], а также книгу Аарсета [2]).

С другой стороны, наблюдения показывают, что в звёздных скоплениях присутствуют звёзды с возрастами и показателями цвета, сильно отличающимися от средних значений для данного скопления. Звёзды с возрастами, меньшими, чем возраст скопления, выделяются на диаграмме Герцшпрунга-Рассела, располагаясь левее и выше точки поворота. Такие звёзды получили название “голубые бродяги”. Кроме того, могут присутствовать и звёзды старше скопления или обладающие другим химическим составом. Для объяснения этого феномена в литературе было предложено несколько гипотез ([7], [14], [16]), среди которых — и захват звёзд галактического фона. Скорее всего, работает сразу несколько механизмов, поскольку “голубые бродяги” явно не являются однородным классом объектов [22].

К гипотезе захвата обращались различные авторы на протяжении последних 20 лет. Большинство приводило либо чисто аналитические оценки, либо результаты, полученные из сравнительно простых численных моделей. Только за последние 2 года вышло 3 статьи по этой теме, однако в них авторы дают лишь приближённые оценки. В целом большинство авторов приходит к выводу о возможности захвата значительного (до сотен штук) количества звёзд фона в скопления. Основное внимание при этом уделялось либо газовым облакам, из которых впоследствии образуются скопления, либо шаровым скоплениям. К первой группе можно отнести работы Бхатта [5], Феллхауэра и Кроупы [8], Пфламма-Альтенбурга и Кроупы [21] и Уитмана и др. [23].

Первая статья была написана почти 20 лет назад и даёт лишь весьма приблизительную и спорную оценку. Уитман и др. [23] критикуют работу Бхатта [5] и дают аналитическую оценку количества звёзд, которые могут быть захвачены при сжатии облака или скопления (по закону свободного падения).

Две оставшиеся работы [8] и [21] посвящены численному анализу возмож-

ности захвата при сжатии облака с пламмеровским распределением плотности. Общая отличительная особенность всех этих работ — они могут объяснить только наличие в скоплениях звёзд с возрастными большими, чем возраст скопления. Звёзды моложе самого скопления либо были захвачены после его формирования, либо образовались каким-либо другим способом.

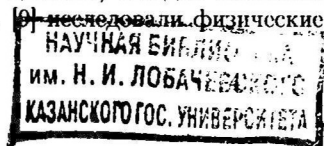
В работах Баранова [3], Бика и др. [6], Миске и Баумгардта [17], Пенга и Вайсхайта [20] рассматривается возможность захвата звёзд фона в скопления, в первую очередь — в шаровые скопления. В работах [6] и [20] для определения количества захватов используется численное решение задачи N тел. Но произвол в выборе начальных данных в обеих работах заставляет усомниться в надёжности получаемых результатов.

Пенг и Вайсхейт [20], кроме численной модели, оценивают аналитически возможность захвата за счёт динамического трения звёзд фона о звёзды скопления. Работа Баранова [3] содержит подробные формулы изменения элементов орбиты тела, пролетающего через вращающееся скопление, за счёт динамического трения. Но при этом автор не приводит конкретных количественных оценок для вероятности захвата. Кроме того, как показано в данной диссертации, динамическое трение — не единственный механизм, который может приводить к захвату звёзд в скопления.

Работа Миске и Баумгардта [17] появилась во второй половине 2007 года, после получения большей части результатов данной диссертации. В этой статье захват моделируется с помощью упрощённой физической модели — звёзды скопления движутся под действием сглаженного фиксированного потенциала скопления и притяжения звёзды фона, а звезда фона — под действием притяжения всех тел скопления. Это позволяет получить значительную статистику (около 10 000 экспериментов для каждого из 9 рассмотренных наборов параметров), однако при этом теряется информация о кратных сближениях и глобальных изменениях потенциала скопления. Тем не менее, несмотря на различия в подходах, полученные в [17] результаты в целом согласуются с результатами данной диссертации (в области пересечения параметров различие менее чем в 2 раза), причём расхождение можно объяснить особенностями выбора начальных данных.

Основной задачей данной работы является получение полной и реалистичной картины процессов, которые могут приводить к захвату звёзд фона скоплениями. Рассматриваются рассеянные скопления, что позволяет проводить численное моделирование в рамках гравитационной задачи N тел. Были выбраны три значения $N = 200, 500$ и 2000 .

Возможность разрушения двойных звёзд фона в скоплениях ранее не исследовалась. Леонард [15] оценил возможность захвата звёзд фона за счёт взаимодействия их с двойными звёздами скопления и пришёл к выводу, что таким сценарием не объяснить всех “голубых бродяг”. Кроме этого процесса существует и симметричный процесс — захват при обмене между двойной фона и одиночной (или двойной) звездой скопления, рассмотренный в данной работе. Фрежо и др. [9] исследовали физические столкновения и слияния звёзд



при тройных и четверных взаимодействиях в ядре скопления. Этими авторами (как и в работах Микколы [18], [19]) рассматривались в основном системы с отрицательной полной энергией. При пролёте двойной через скопление могут происходить сближения двойных с положительной относительной полной энергией. Более того, для захвата звезды в скопление не обязательно должно происходить физическое столкновение звёзд, возможен и динамический захват. Кроме того, в некотором приближении можно рассматривать как взаимодействие двух двойных и сближение двойной звезды с двумя одиночными, если скорость сближения превышает орбитальную скорость двойной и характерные скорости движения одиночных звёзд.

Современные наблюдения позволяют изучать динамическую структуру скоплений, определять входящие в него звёзды. Для этого можно использовать параллаксы и собственные движения, а при их отсутствии — спектральные характеристики, например, показатели цвета и металличность. Большинство методов являются не слишком надёжными и носят скорее статистический характер. Тем не менее, надёжно установлено, что во многих скоплениях присутствуют звёзды, сильно отличающиеся от остальных по возрасту и химическому составу. Понимание причин появления подобных звёзд может дать новую информацию об эволюции звёзд и скоплений. Одним из возможных, но недостаточно изученных объяснений является захват звёзд фона скоплениями как в процессе формирования, так и после него. Данная работа попытается, в первую очередь, ответить на вопрос об возможности захвата звёзд в скопления, и определить, от чего зависит эффективность захвата.

1.2 Цели работы

В данной работе были поставлены следующие основные цели.

- Определение вероятности захвата звёзд фона рассеянными скоплениями в зависимости от скоростей звёзд фона и параметров скопления.
- Оценки вероятностей различных исходов (пролёта, захвата, распада с частичным захватом или распада без захвата) при взаимодействии скопления с двойной звездой фона.
- Получение сечений различных исходов при сближении двух двойных с положительной энергией их относительного движения.
- Нахождение сечений захвата при тройных и четверных сближениях и оценка вклада этих процессов в процесс захвата звёзд в скопление.
- Оценка общего количества звёзд фона, которые могут быть захвачены за время жизни скопления.

1.3 Научная новизна

Впервые проводится детальное исследование взаимодействия звёзд фона со скоплениями. В работе применены аналитические, полуаналитические и численно-экспериментальные подходы.

Впервые рассмотрены процессы захвата и распада двойных звёзд фона в скоплениях. Численно оценены вероятности распада двойной при пролёте через скопление и вероятности захвата двойной или её компонентов скоплением. В рамках решения этой задачи впервые получены распределения финальных скоростей звёзд при тройных взаимодействиях с распадом в различных системах отсчёта. Определены сечения захвата при столкновении двойной и одиночной звёзд. Показано, что величина сечения почти не зависит от большой полуоси двойной.

Впервые получены сечения одно- и двухкратной ионизации, обмена и захвата при сближении двух двойных со значительной положительной полной энергией.

1.4 Научная и практическая ценность работы

В результате проделанной работы показан сложный характер механизмов, которые могут приводить к захвату звёзд фона в скопления. Это случайные блуждания в пространстве скоростей, одиночные сильные взаимодействия, распад двойных звёзд фона внутри скопления и кратные взаимодействия. Выявлен квази-нормальный характер процессов — небольшие отклонения скорости описываются нормальным законом, а для больших отклонений закон распределения становится степенным.

Рассмотренные процессы могут приводить к появлению внутри скоплений звёзд с возрастными и металличными, значительно отличающимися от средних значений для скоплений. В некоторых условиях может быть захвачено до нескольких десятков звёзд.

Надёжность полученных выводов подтверждается согласием с результатами, независимо полученными Миске и Баумгардтом [17], а также согласием аналитических оценок с результатами моделирования методом Монте-Карло и в рамках задачи N тел.

Моделирование в рамках задачи трёх (сближение двойной звезды с одиночной) и четырёх (сближение двух двойных) тел является логическим продолжением исследований рассеяния одиночных звёзд на двойных, активно проводимых Хютом, Хегги и их соавторами [10, 11, 12]. Этот процесс может играть важную роль в эволюции скопления.

В ходе работы был разработан ряд утилит для статистической обработки числовых таблиц, построения графиков, анализа исходного кода; модифицированы существующие программы для моделирования систем трёх (TRIPLE) и нескольких (от 4 до 20) тел (CHAIN).

1.5 Апробация работы

Результаты представляемой работы докладывались на семинаре кафедры небесной механики СПбГУ, общегородском семинаре им. К.Ф. Огородникова по звёздной динамике, семинаре Astronomisches Rechen Insitut (ARI) в Гейдельберге (Германия). Доклад по данной работе был отмечен первой премией семинара-конкурса аспирантских и студенческих работ, проходившего в СПбГУ 20 сентября 2006 года. Часть работы была выполнена в рамках годовой стипендии DAAD (Германская служба академических обменов). Кроме того, результаты были представлены на следующих международных научных конференциях и школах:

- 1) Workshop in celebration of the 60th Birthday of Professor Mauri Valtonen “Few-Body Problem: Theory and Computer Simulations”, 4-9 July 2005, University of Turku, Finland.
- 2) MODEST-5C: Summer school on direct N-body simulations. 24-30 July 24, 2005, Amsterdam, Netherlands.
- 3) Hoher List workshop of Rhein Stellar Dynamics Network (RSDN), 25-27 November, 2005, Hoher List Observatory, Bonn, Germany.
- 4) CECAM tutorial: Programming Parallel Computers, 22-26 January, 2007, Juelich, Germany
- 5) Conference “Dynamics of Galaxies”, 6-10 August 2007, Pulkovo Observatory, St. Petersburg, Russia.

1.6 Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, трёх приложений и списка цитируемой литературы (61 наименование), организованного в алфавитном порядке. Общий объем диссертации — 102 страницы, содержащих 28 рисунков и 9 таблиц.

2 Краткое содержание работы

Во **введении** приводится обоснование актуальности работы, сформулированы цели, новизна, научная и практическая ценность полученных результатов. Приведены выносимые на защиту результаты, список публикаций автора по теме диссертации и апробация работы.

В **первой главе** представлено современное состояние изучаемой проблемы, проанализированы основные существующие статьи по теме диссертации. В восьми рассмотренных работах использованы различные подходы к проблеме захвата звёзд фона в облака и скопления. Обсуждается надёжность полученных

результатов. Приводится краткий обзор оценок количества двойных в галактическом фоне и их распределения по большим полуосям орбит.

Во **второй главе** приведён вывод количества звёзд однородного фона, пролетающих в единицу времени через скопление, в зависимости от свойств распределения скоростей звёзд фона и параметров скопления. Показано, что при больших скоростях звёзд фона это количество пропорционально квадрату массы скопления и первой степени среднесквadraticной скорости звёзд фона. Вместе с тем, если рассматривать только “медленные” звёзды фона со скоростями не более нескольких среднесквadraticных скоростей звёзд скопления, то их число будет убывать с ростом среднесквadraticной скорости звёзд фона.

Систематическое движение скопления относительно фона приводит к увеличению общего количества пролетающих звёзд фона, но в то же время к уменьшению количества пролётов с небольшой скоростью. Аналитическая форма распределения скоростей становится в этом случае более сложной, однако качественно её вид не сильно отличается от случая неподвижного скопления. В результате получается, что наиболее эффективен захват звёзд фона для скопления, не движущегося относительно фона.

В **третьей главе** оценивается вероятность захвата одиночной звезды фона скоплением. Приводятся два приближённых аналитических подхода к проблеме — случайные блуждания в пространстве скоростей (для медленных звёзд, с систематическими скоростями на бесконечности меньше среднесквadraticной скорости звёзд скопления) и одно сильное взаимодействие (для быстрых звёзд). В последнем случае вероятность захвата убывает приблизительно по закону $P \propto v_0^{-6}$, где v_0 — скорость звезды фона на бесконечности относительно центра масс скопления.

Далее в этой главе приводятся результаты моделирования методом Монте-Карло, согласующиеся со сделанными аналитическими оценками.

Затем приводятся результаты численного моделирования в рамках гравитационной задачи N тел. Отражены результаты более 17 000 численных экспериментов для трёх значений количества звёзд в скоплении ($N = 200, 500$ и 2000) и двух значений массы звезды фона (нулевая и равная массе звезды скопления). В основном вероятности захвата согласуются с результатами моделирования методом Монте-Карло и аналитическими оценками при малых и больших скоростях, но есть и отличия. В частности, для больших скоростей наблюдается систематическое превышение количества захватов в моделях N тел над предсказанными аналитически значениями, обусловленное наличием в скоплении концентрации к центру и кратными сближениями.

В **четвёртой главе** оцениваются вероятности захвата двойной звезды фона и её распада в скоплении. Приведены результаты более 14 500 численных экспериментов для трёх значений начальной большой полуоси двойной — 0.005, 0.01 и 0.05 (в единицах радиуса скопления). Вероятность захвата двойной как целого почти не отличается от вероятности захвата одиночной звезды для тесных двойных и быстро убывает с ростом начального значения полуоси — захваченные двойные в основном распадаются в скоплении. Вероятность распада

хорошо описывается приводимыми Хютом и Бакаллом [11] формулами для сечения распада двойной при сближении с одиночной звездой. Для скоростей пролёта более среднеквадратичной скорости звёзд скопления вероятность захвата двойной убывает быстрее, чем вероятность захвата одиночной звезды, зато увеличивается вероятность распада двойной с последующим захватом одного или обоих её компонентов в скопление. В итоге общая вероятность захвата двойной или её компонентов в скопление почти не отличается от вероятности захвата одиночной звезды.

В пятой главе рассмотрены случаи кратных взаимодействий — сближения двойной звезды с одиночной или с другой двойной. На основании результатов в общей сложности более двух миллионов численных экспериментов получены сечения различных исходов при таких взаимодействиях. Определены распределения финальных скоростей звёзд при распаде двойной, что позволяет вычислить сечения захвата в тех случаях, когда финальные скорости одиночных или двойных звёзд (в системе отсчёта, связанной с одним из начальных объектов) оказываются меньше критического значения — скорости ухода из скопления.

Полученные сечения качественно согласуются с полученными в главах 3 и 4 избыточными вероятностями захвата при больших скоростях, что указывает на то, что этот избыток вызван в первую очередь кратными взаимодействиями.

В заключении в первом разделе определяется общее количество звёзд фона, которые могут быть захвачены в скопление за время его жизни. Полученные результаты сравниваются с результатами других авторов, в первую очередь — Миске и Баумгардта [17]. В области сопоставимости результаты близки (это отмечают и авторы статьи [17]), что подтверждает их достоверность. Вместе с тем из-за больших значений вероятности захвата для быстрых звёзд фона, вклад которых в общее количество захватов довольно высок, общее количество возможных захватов оказывается выше в данной диссертации. Общее число таких захватов для типичного рассеянного скопления составляет несколько единиц за время жизни скопления. С ростом массы скопления ожидается приблизительно линейный рост количества захватов, хотя прямая экстраполяция результатов на два-три порядка по массе едва ли возможна. Во втором разделе заключения приводятся основные результаты работы.

В приложении А описан использованный программный пакет NBODY6++.

В приложении В описан ряд вспомогательных программ, разработанных автором.

В приложении С приведены подробные выводы некоторых формул.

3 Положения, выносимые на защиту

- Аналитические оценки вероятности захвата одиночных звёзд фона скоплениями в двух предельных режимах взаимодействия: 1) диффузия в пространстве скоростей (для медленных звёзд); 2) захват при однократном сильном взаимодействии (для быстрых звёзд).

- Численные оценки вероятности захвата при взаимодействии одиночных и двойных звёзд фона со скоплениями в зависимости от начальной скорости звезды поля, количества звёзд в скоплении и начальной большой полуоси (в случае двойной).
- Вероятности различных исходов (ионизация, двукратная ионизация, обмен, захват) при сближении двойной с одиночной или двойной звездой. Оценка вклада кратных сближений в общую вероятность захвата в скопление.
- Оценка общего количества звёзд поля, которые могут быть захвачены за время жизни скопления. Это число явно недостаточно для влияния на цвет скопления в целом, но может частично (хотя и не полностью) объяснить наличие в скоплениях “голубых бродяг” и звёзд с пекулярным химическим составом.

4 Список публикаций автора по теме диссертации

- 1) A.A. Mints, P. Glaschke, R. Spurzem. Open cluster — single star scattering.// MNRAS, 2007, v. 379, p. 86-92.
- 2) A.A. Минц. Взаимодействие двойных звёзд со скоплениями.// Письма в Астрон. журн., 2008, т. 34, N1 (январь), с. 1-7.
- 3) A.A. Mints. Encounters between open clusters and single or binary field stars.// “Dynamics of Galaxies”, abstracts of the conference held at Pulkovo Observatory, 6-10 August, 2007., ed. L. Ossipkov, V. Reshetnikov, N. Sotnikova. p. 29.

5 Личный вклад автора

В совместной работе вклад автора состоит в постановке задачи и проведении вычислений. Получение теоретических оценок и обсуждение результатов проводилось совместно с соавторами.

Для работ 1 и 2 (главы 3 и 4) было проведено в общей сложности более 30 000 численных экспериментов (более 1000 часов процессорного времени). Для получения результатов пятой главы было выполнено около миллиона численных экспериментов с использованием программы Сверре Аарсета TRIPLE и ещё около миллиона экспериментов с программой CHAIN.

Список литературы

- [1] А.В. Рубинов, А.В. Петрова и В.В. Орлов. Влияние звёздного ветра, динамического трения и слияний звёзд на динамическую эволюцию кратных звёзд. *ПАЖ*, 30(11):936, 2004.
- [2] S.J. Aarseth. *Gravitational N-Body simulations, Tools and algorithms*. Cambridge University Press, 2003.
- [3] A.S. Baranov. Capture of stars by rotating homogeneous spherical clusters. *Celest.Mech.*, 11:517, 1975.
- [4] H. Baumgardt, P. Hut, and D. C. Heggie. Long-term evolution of isolated N-body systems. *MNRAS*, 336:1069, November 2002.
- [5] H.C. Bhatt. Capture of field stars by molecular clouds. *A&A*, 213:299–302, 1989.
- [6] E. Bica, H. Dottori, and I.R. de Oliveira Filho. Capture of field stars by globular clusters in dense bulge regions. *ApJ*, 482:L49, 1997.
- [7] F. de Marchi, F. de Angeli, G. Piotto, G. Carraro, and M.B. Davies. Search and analysis of blue straggler stars in open clusters. *A&A*, 459:489, 2006.
- [8] M. Fellhauer, P. Kroupa, and N. W. Evans. Complex stellar populations in massive clusters: trapping stars of a dwarf disc galaxy in a newborn stellar supercluster. *MNRAS*, 372:338, 2006.
- [9] J.M. Fregeau, P. Cheung, S.F. Portegies Zwart, and F.A. Rasio. Stellar collisions during binary-binary and binary-single star interactions. *MNRAS*, 352:1, 2004.
- [10] P. Hut. Binary-single star scattering. II. Analytic approximations for high velocity. *ApJ*, 268:342, 1983.
- [11] P. Hut and J.N. Bahcall. Binary-single star scattering. I. Numerical experiments for equal masses. *ApJ*, 268:319, 1983.
- [12] P. Hut and J. Makino. Moving stars around. <http://www.artcompsci.org/index.html>.
- [13] E. Khalisi. *Equipartition and mass segregation*. PhD thesis, Astronomisches Rechen Institut (ARI), 2002.
- [14] N. Leigh, A. Sills, and C. Knigge. Where the Blue Stragglers Roam: Searching for a Link between Formation and Environment. *ApJ*, 661:210, 2007.
- [15] P.J.T. Leonard. The capture of field stars by open clusters: Can it explain the blue stragglers? *BAAS*, 17:882, 1985.

- [16] P.J.T. Leonard. Stellar collisions in globular clusters and the blue straggler problem. *AJ*, 98:217, 1989.
- [17] S. Mieske and H. Baumgardt. On the efficiency of field star capture by star clusters. *A&A*, 475:851, 2007.
- [18] S. Mikkola. Encounters of binaries - I. Equal energies. *MNRAS*, 203:1107, 1983.
- [19] S. Mikkola. Encounters of binaries - II. Unequal energies. *MNRAS*, 207:115, 1984.
- [20] W. Peng and J.C. Weisheit. Field star diffusion in globular clusters. *MNRAS*, 258:476, 1992.
- [21] J. Pflamm-Altenburg and P. Kroupa. Captured older stars as the reason for apparently prolonged star formation in young star clusters. *MNRAS*, 375:855, 2007.
- [22] L.L. Stryker. Blue stragglers. *PASP*, 105:1081, 1993.
- [23] P.G. Whitman, J.J. Matese, and D.P. Whitmire. Dynamical capture of field stars by interstellar clouds. *A&A*, 245:75, 1991.

Подписано в печать 05.03.2008 г.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Формат 60 × 84 1/16.
Усл. печ. л. 1,0. Заказ 4160.

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии химического факультета СПбГУ
198504, Санкт-Петербург, Университетский пр. 26.

162